第40卷 第3期
2023年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

灌溉水矿化度对棉田土壤呼吸速率的影响

李燕强[1,2,3]， 王振华[1,2,3]， 叶含春[1,2,3]， 宋利兵[1,2,3]， 刘 健[1,2,3]，
温 越[1,2,3]， 武小荻[1,2,3]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆 石河子 832000；
3. 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室，新疆 石河子 832000）

摘 要：为探究不同灌溉水矿化度对棉田土壤呼吸速率的影响，设置了4个灌溉水矿化度，分别为0.85 g·L^{-1}（CK，当地灌溉水矿化度）、3 g·L^{-1}（S1）、5 g·L^{-1}（S2）和8 g·L^{-1}（S3），在新疆进行了膜下滴灌棉花大田试验。在棉花生育期，每月采集两次土壤呼吸速率值（R_s），并同时监测土壤温度（ST）、含水率（SWC）、电导率（EC）、硝态氮含量（NO_3^--N）、铵态氮含量（NH_4^+-N），运用通径分析研究了灌溉水矿化度下土壤参数对土壤呼吸速率的影响。结果表明：微咸水灌溉（S1和S2）在一定程度上提高了土壤含水率、电导率和铵态氮含量；咸水灌溉（S3）显著增加了土壤水分和盐分，并降低了土壤硝态氮含量；灌溉水矿化度的增加会减弱土壤呼吸速率。土壤的水分和温度与呼吸速率的相关性，随灌溉水矿化度的增加而呈减弱趋势。通过运用二次函数式来表示0~10 cm的土层温度对土壤呼吸速率的响应（R^2=0.669，P<0.001），得出土壤呼吸速率最适宜的土壤温度为26.9 ℃。咸水灌溉下，含土壤温度、电导率、硝态氮含量的逐步回归方程可以解释土壤呼吸速率变化的85%。综上，利用3 g·L^{-1}的灌溉水进行膜下滴灌，能够在不显著增加土壤含盐量的基础上，降低土壤呼吸速率，减少农田碳排放量，可以为新疆微咸水资源的开发利用提供理论支撑。

关键词：土壤参数；土壤呼吸；灌溉水矿化度；逐步回归；通径分析

2021年新疆棉花种植面积、产量分别占全国的82.7%和89.5%[1]，是我国最重要的棉花生产地。气候干旱、降雨稀少使得当地淡水资源严重不足，农业用水短缺，严重影响棉花产业的发展。而新疆咸水资源储量丰富，利用潜力巨大[2]，是淡水资源的理想替代品，可以有效解决淡水资源短缺的窘境，确保棉花产业的持续发展。众多学者认为，若灌溉管理方式科学合理，咸水可以用于农业灌溉[3-5]。

科学合理利用咸水资源灌溉的前提是保证咸水灌溉的安全性，而这也是目前咸水灌溉尚未大面积推广的关键原因[5]。咸水灌溉的安全性主要体现在两方面，一是咸水灌溉容易使土壤产生盐渍化的风险，二是咸水灌溉可能会增加农田温室气体排放[6]。土壤呼吸是指土壤生物在进行生命活动的过程中释放CO_2的过程[7]。已有研究表明，土壤呼吸主要受土壤湿度和温度的双重调控[8-9]。咸水灌溉对土壤环境的影响是复杂的、多方面的。土壤环境的改变不但会影响作物的生长，而且也会对土壤微生物活动以及某些生化反应产生影响[10-13]，最终影响到土壤呼吸。但关于咸水灌溉对土壤呼吸的影响研究较少且结论不一。魏琛琛等[14-15]探究了不同盐度（1.1 g·L^{-1}和5.0 g·L^{-1}）水平土壤CO_2的排放量，结果表明灌溉水含盐量增加会使土壤CO_2排放量显著降低。但也有研究表明，咸水灌溉在一定条件下会增加土壤CO_2的排放量[6,12]。土壤呼吸是土壤碳向大气碳转换的重要过程，其微小的改变都会影响碳循环的稳定，进而影响气候变化和粮食安全[16]。科学调控土壤呼吸，增强农田土壤的固碳能力，不仅是减缓温室效应的重要手段，同时也是实现我国“碳中和”的有效途径之一[17]。因此，探究咸水膜下滴灌条件下土壤参数对土壤呼吸的影响，对于阐明土壤呼吸机理和安全高效利用咸水资源具有重要

收稿日期：2022-05-16； **修订日期：**2022-08-17
基金项目：国家自然科学基金项目（51869028）；兵团重点领域创新团队项目（2019CB004）
作者简介：李燕强（1996-），男，硕士研究生，主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究. E-mail: 1714072730@qq.com
通讯作者：叶含春. E-mail: 739301184@qq.com

的意义[13]。

本文通过设置不同灌溉水矿化度膜下滴灌棉花试验，分析不同灌溉水矿化度下棉田土壤温度、土壤含水率、土壤电导率、土壤铵态氮和硝态氮含量及土壤呼吸速率的变化规律，旨在探索咸水灌溉下土壤环境对土壤呼吸的影响机理，为咸水灌溉提供理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

在石河子大学节水灌溉试验站（44°19′28″N，85°59′47″E，海拔451 m，平均地面坡度为6‰）完成试验。试验站位于准葛尔盆地南缘、天山北麓中段，年平均蒸发量和年平均降水量分别为1660 mm、207 mm，无霜期为170 d，土壤为中壤土，土壤容重为1.45 g·cm^{-3}。2021年棉花生育期内逐日气温与降雨如图1所示。

1.2　试验设计

供试棉花品种为新陆早42号，于2021年4月13日播种，采用"一膜三管六行"的种植模式，地膜宽为205 cm，滴灌带相距80 cm，膜距25 cm。试验共设计4个处理，变量为灌溉水矿化度，分别为0.85 g·L^{-1}（CK，当地灌溉水矿化度）、3 g·L^{-1}（S1）、5 g·L^{-1}（S2）、8 g·L^{-1}（S3），通过当地灌溉用水与工业用盐调配实现。每个处理设3个重复，小区面积为105 m^2（7 m×15 m），共12个。为保证棉花出苗，出苗水全部采用淡水。根据已有研究[18-19]和当地灌溉经验，灌溉定额为4500 m^3·hm^{-2}，各处理施加尿素（N：46.4%）600 kg·hm^{-2}，施加磷酸二氢钾（P_2O_5：51.5%）300 kg·hm^{-2}，随水滴施，棉花生育期灌溉及施肥方案如表1所示。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　土壤呼吸速率（R_S）　使用LI-8100（LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA）对土壤呼吸速率进行监测，仪器配有密闭气室和聚氯乙烯（PVC）环（内径20.3 cm，外径21.3 cm，高11.4 cm）。棉花定苗后，于每个处理在膜上距中间行棉花5 cm处布置3个PVC环，环上部5 cm暴露于土壤表面，保证环内外环境一致，环位置在棉花生育期内保持不变。从第一次处理后开始，选择晴朗的日子在当地时间上午9:00—11:00进行土壤呼吸速率的监测，采用系统循环两次测量的结果为本次土壤呼吸速率的测量值，并用作

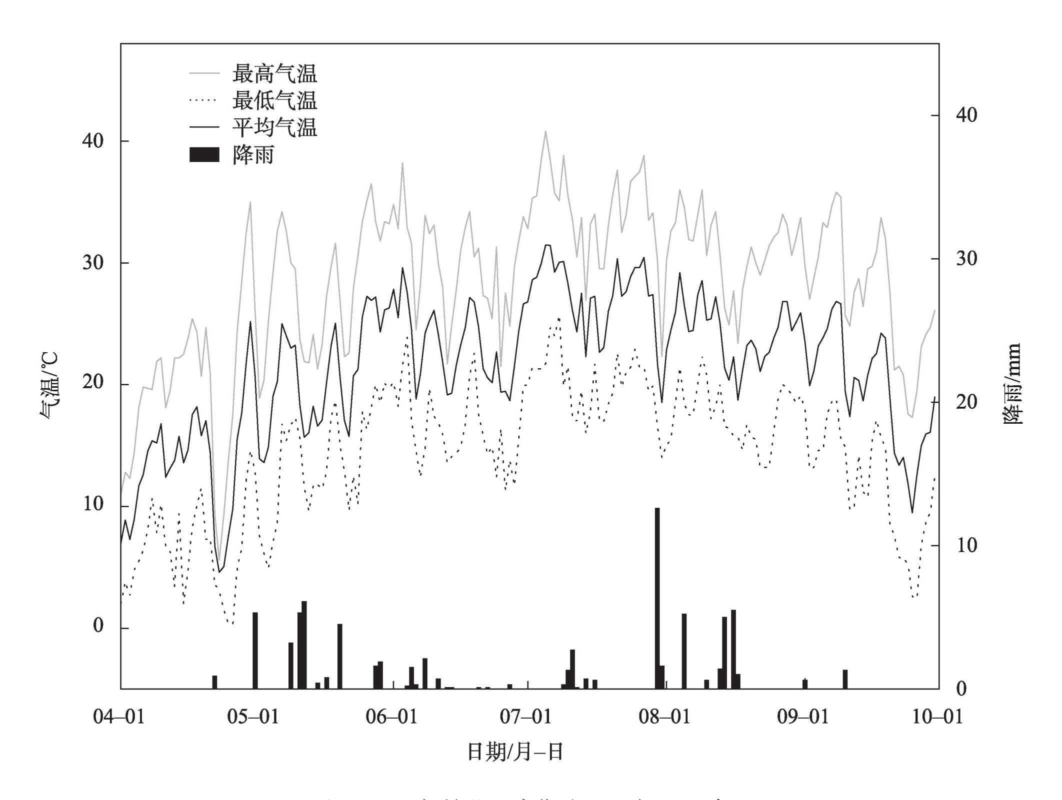


图1　2021年棉花生育期内逐日气温和降雨

Fig. 1　Daily temperature and precipitation during cotton growth period in 2021

表1 棉花生育期灌溉及施肥方案

Tab. 1 Irrigation and fertilization program during cotton growth period

生育期	灌水周期/d	灌水次数	灌水比例/%	施肥比例/%
苗期	15	3	10	10
蕾期	10	2	15	15
花铃期	7	5	60	60
吐絮期	20	1	15	15
全生育期	160	11	100	100

当日的土壤呼吸速率[20]。为避免环境造成的误差，每次测量均放在灌溉或降雨后的3~5 d，每月测量2次。

1.3.2 土壤温度(ST) 土壤温度通过土壤碳通量系统配备的温度探头进行测量，测量深度为10 cm，与土壤呼吸测定同步。

1.3.3 土壤含水率(SWC)和土壤电导率(EC) 用土钻于每个小区种植行处每10 cm采集土壤样品，深度为40 cm。并用烘干法测定各土层土壤质量含水率，用电导率仪(DDS11-A)测定土壤电导率。取样时间与土壤呼吸测定同步进行。

1.3.4 土壤铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N) 用土钻于每个小区种植行处取样，深度40 cm，间隔为20 cm。用2 mol·L^{-1}氯化钾浸提液对新鲜土样进行前处理，再使用全自动间断化学分析仪(CleverChem)，测定土样溶液中的铵态氮和硝态氮浓度，得到土壤硝态氮和铵态氮含量。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 通径分析 通径分析是在相关性分析和回归分析的基础上，把自变量与因变量之间的表面相关性进行分解，研究自变量对因变量的直接影响和间接影响，探究各因素对因变量的影响程度，进而为统计决策提供可靠的依据。本文在不同灌溉水矿化度处理下，利用通径分析法建立了土壤呼吸速率与土壤参数之间的逐步回归方程，并求得了土壤参数和土壤呼吸速率间的通径系数，最终确定了不同灌溉水矿化度下土壤参数对土壤呼吸速率的影响程度。

1.4.2 统计分析 使用Excel 2016进行数据整理计算，SPSS 26.0进行处理间的差异显著性(显著水平$P<0.05$)检验，使用Origin 2021进行绘图。其中，用每个处理全生育期的数据进行分析土壤呼吸速率与影响因子的相关性；土壤呼吸速率与土壤温度的拟合数据采用每个处理各生育时期相应值，拟合用二次方程的形式。通径分析中均采用每个处理全生育期的相应数据。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤呼吸速率及其影响因子的变化

棉田土壤呼吸速率随生育期呈先增后减的变化趋势(表2)。蕾期时，棉田土壤呼吸速率最大，吐絮期时最小。S1、S2、S3的土壤呼吸速率较CK均减小，差异在苗期最大，花铃期最小。S1、S2、S3处理的土壤呼吸速率较CK的土壤呼吸速率，苗期时分别降低了13.04%、39.05%、46.27%；蕾期时分别降低了10.62%、20.11%、27.54%；花铃期时分别降低了8.20%、13.60%、22.35%；吐絮期时分别降低了8.06%、21.85%、27.37%。

不同灌溉水矿化度下的土壤温度如表3所示，

表2 不同灌溉水矿化度下不同生育期的土壤呼吸速率

Tab. 2 Soil respiration rate at different growth stages under different irrigation water salinity

处理	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
CK	6.97±0.63a	7.41±0.92a	3.09±0.12a	3.02±0.07a
S1	6.06±0.33ab	6.62±0.40ab	2.81±0.34ab	2.78±0.04a
S2	4.25±1.20bc	5.92±0.08b	2.67±0.29ab	2.36±0.24b
S3	3.75±0.84c	5.37±0.19b	2.40±0.23b	2.19±0.08b

注：同列不同小写字母代表处理间差异性显著($P<0.05$)。下同。

在苗期、蕾期，S1、S2、S3处理的土壤温度较CK均有增加，但苗期时差异显著，蕾期时差异不显著。土壤温度在花铃期和吐絮期，S1、S2、S3较CK更低，但仅S3较CK差异显著，S2仅在吐絮期较CK差异显著，S1较CK差异始终不显著。在棉花生育期，S2和S3水平下的土壤含水率相比于CK，分别显著增大了10.05%~40.95%、20.86%~63.32%。S1的土壤含水率较CK处理总体上增加了4.89%~27.69%，但在苗期时，无显著性差异。

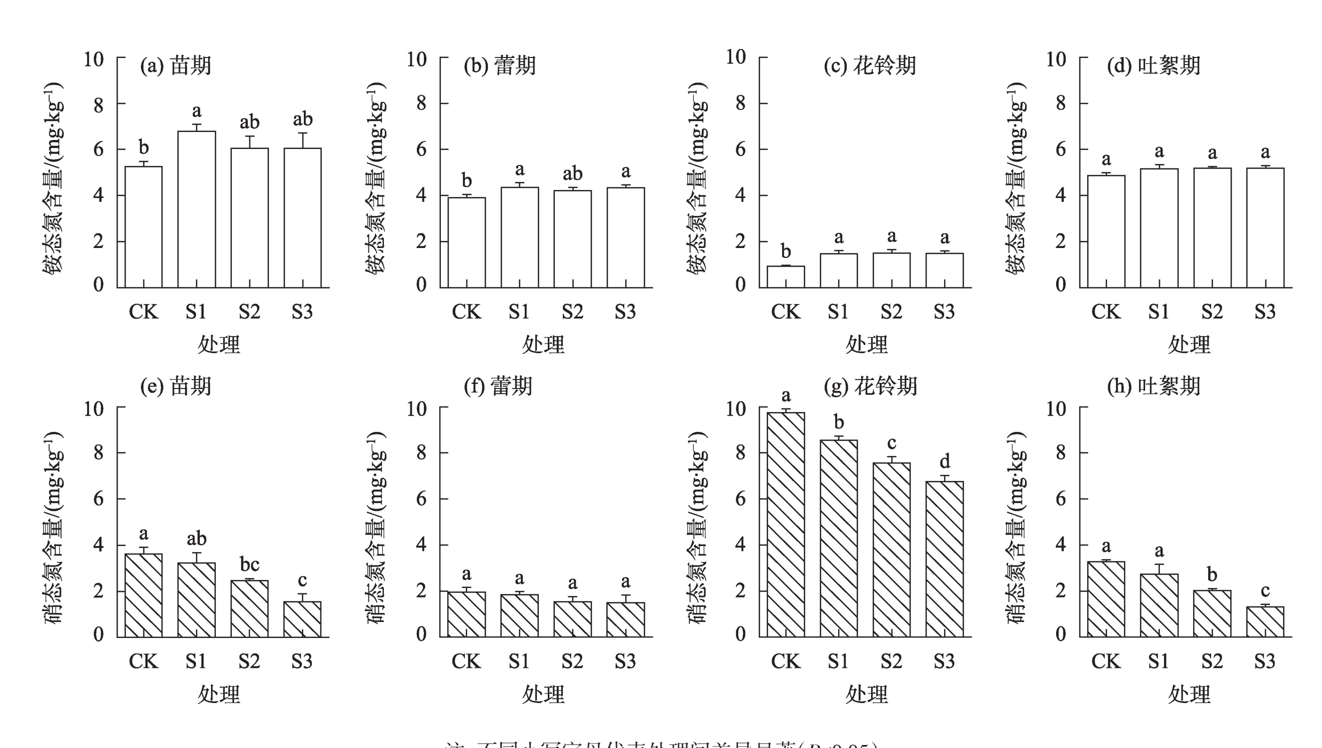
生育期内，S1、S2、S3处理的土壤电导率较CK均有所增加，增加幅度在苗期最小，蕾期和花铃期次之，吐絮期最大，这和土壤呼吸速率的变化正好相反。各处理的土壤电导率在吐絮期达到最大，而各处理的土壤呼吸速率在吐絮期达到最小，说明盐分累积对土壤呼吸速率的影响在随生育期逐渐增大。生育期内的S2、S3处理的土壤电导率较CK处理均显著增加了4.83%~88.31%、12.84%~135.82%。S1处理的电导率较CK处理增加了2.64%~50.64%，但仅在吐絮期差异显著。

棉花生育期内的土壤铵态氮含量如图2所示，S1、S2、S3处理较CK处理均有所增加，且随生育期呈现出先减后增的变化，并在0.93~6.78 mg·kg^{-1}波动。苗期，土壤铵态氮含量S1较CK显著增加了28.94%，S2、S3相较于CK无显著差异。在蕾期，土壤铵态氮含量S1和S3相较于CK显著增加了11.22%和11.03%，而S2相比于CK无显著差异。花铃期，S1、S2、S3较CK显著提高了58.51%、61.66%、59.86%。吐絮期时，所有处理的土壤铵态氮含量均在5 mg·kg^{-1}左右，且无显著差异。

在生育期内土壤硝态氮含量随灌溉水矿化度的升高而降低，且整个生育期呈先减后增再减的波动变化，如图2所示。苗期，S2、S3相较于CK，土壤硝态氮含量显著减少了31.91%和56.94%；S1相较于CK，土壤硝态氮含量仅降低了10.59%。蕾期相较于其他生育期，CK、S1、S2、S3的土壤硝态氮含量最小，都在2 mg·kg^{-1}左右，且无显著差异。花铃期，S1、S2、S3处理相较CK处理显著减小了12.35%、22.36%、30.72%的土壤硝态氮含量。吐絮期，S2、S3处理比CK处理的土壤硝态氮含量，显著降低了38.26%和59.99%，且S1处理与CK处理的土壤硝态氮无显著差异。

2.2 土壤呼吸速率与各土壤参数的相关性分析

对生育期内各处理的土壤呼吸速率与土壤参数进行相关分析（表4）。其中土壤温度与土壤呼吸



注：不同小写字母代表处理间差异显著（P<0.05）。

图2　不同灌溉水矿化度处理下棉花各生育期0~40 cm土壤铵态氮和硝态氮的含量

Fig. 2　The contents of ammonium and nitrate nitrogen in 0~40 cm soil during cotton growth period under different irrigation water salinity treatments

速率的相关性指数为0.612~0.805，均为显著正相关，说明本研究中土壤温度是影响土壤呼吸速率的主控性因子。土壤含水率与土壤呼吸速率的正相关性随灌溉水矿化度的升高而减弱，仅在CK处理下达到显著性水平。说明S1、S2、S3处理下的土壤含水率对土壤呼吸速率的影响在减弱。由表4可知，随着灌溉水矿化度的增加，土壤电导率对土壤呼吸速率的影响是呈先增加后减小的状态。说明灌溉水矿化度超过一定值以后，土壤盐分对土壤呼吸速率的影响不能再用表面的简单相关性去解释。各矿化度水平下，土壤硝态氮含量均与土壤呼吸速率为负相关，土壤铵态氮含量与之相反。随着灌溉水矿化度的增加，土壤硝态氮含量和土壤呼吸速率的相关性呈逐渐减小的变化趋势，土壤铵态氮含量和土壤呼吸速率的相关性呈先增加后减小的变化。

由相关性分析，土壤温度和土壤水分及土壤电导率在各处理下均显著相关，而土壤水分和土壤铵态氮及硝态氮显著相关，说明各土壤参数之间相互影响。

所有处理下土壤温度与土壤呼吸速率均显著相关（表4），为进一步探究土壤温度对土壤呼吸速率的影响，对0~10 cm的土层温度和土壤呼吸速率，进行回归分析（图3），其余土壤参数与土壤呼吸速率的相关性均未达到显著性水平，不具备回归分析的基础，故未对其进行回归分析。由图3可知，随着土壤温度的增加，土壤呼吸速率呈先增加后减小的变化趋势。以二次式来表征土壤呼吸速率与土壤温度的关系，R^2=0.669（P<0.001）。由拟合函数分析可知（图3），土壤呼吸速率最适宜的0~10 cm的土壤温度为26.9 ℃。

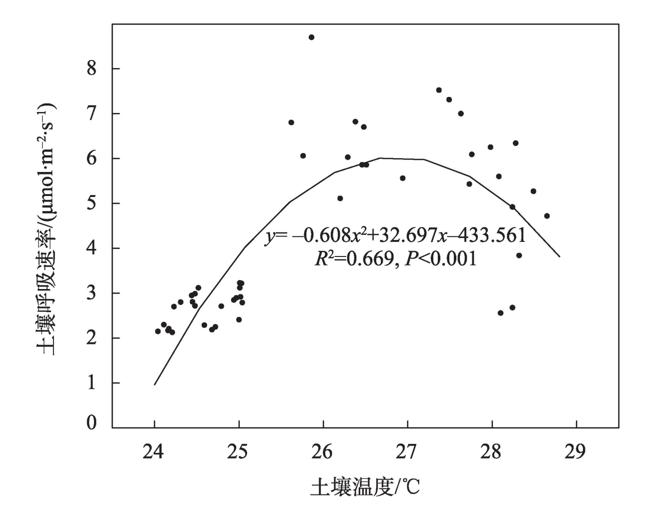


图3 棉田土壤温度与土壤呼吸速率的回归关系

Fig. 3 Regression relationship between soil temperature and soil respiration rate in cotton field

表5为各土壤参数与土壤呼吸速率的逐步回归方程，均达到显著性水平（P<0.05）。CK、S1、S2和S3处理下的土壤呼吸速率通过逐步回归得到的方程可以表达土壤呼吸速率变异的82.22%、64.03%、37.51%和85.02%。为了探明各土壤参数对土壤呼吸速率的直接影响和间接影响，表6给出了各土壤参数与土壤呼吸速率的直接通径和间接通径。

由通径分析结果表6可知，CK和S1处理下，土壤硝态氮含量对土壤呼吸速率的直接影响最大（直接通径系数为−1.051和−1.182）；S2和S3处理下，土壤温度对土壤呼吸速率的直接影响最大（直接通径系数为2.305和1.542）。CK处理下的土壤含水率对土壤呼吸速率的直接影响和间接影响均为促进效果，S1、S2、S3处理下的土壤含水率对土壤呼吸速率的直接影响和间接影响均为抑制效果，说明微咸水或咸水处理下的土壤含水率对土壤呼吸速率是一个充足的状态。S2、S3处理下，土壤电导率和土壤水分通过影响土壤温度来影响土壤呼吸速率的作用（间接通径系数为1.676和−1.740、1.206和−1.032）较CK处理增强了。但土壤水分和土壤电导率通过影响土壤温度来影响土壤呼吸速率的作用相反，所以最终导致其与土壤呼吸速率的相关性减弱。

3 讨论

3.1 灌溉水矿化度对土壤呼吸速率的影响

土壤呼吸是表征土壤环境和作物生长的关键性指标[21-22]。不同的灌溉施肥策略、种植模式、翻耕、覆膜、秸秆还田等农艺措施等都会对土壤呼吸速率产生影响，本质都是通过改变土壤环境（如土壤温度、水分、盐分、养分等）来影响土壤微生物呼吸和作物根呼吸，进而影响土壤呼吸[23]。灌溉水矿化度的不同同样会使土壤环境发生改变，从而影响土壤呼吸速率。本研究发现，使用3 g·L^{-1}的灌溉水不会对土壤呼吸速率产生显著影响，5 g·L^{-1}和8 g·L^{-1}的灌溉水会显著降低土壤呼吸速率。周慧等[24]也通过对不同盐碱地土壤呼吸速率的监测发现，高

表3 不同处理下各生育期的土壤温度、含水率、电导率

Tab. 3 Soil temperature, moisture and electric conductivity of different treatments at different growth stages

生育期	处理	土壤温度/℃	土壤含水率/%	土壤电导率/(μS·cm⁻¹)
苗期	CK	27.54±0.16b	17.72±0.19c	268.57±4.34c
	S1	28.11±0.12a	18.59±0.23c	275.65±4.58bc
	S2	28.28±0.16a	19.70±0.14b	281.55±0.62b
	S3	28.40±0.18a	21.42±0.71a	303.06±2.87a
蕾期	CK	26.24±0.27a	14.18±0.14d	384.53±3.01c
	S1	26.34±0.92a	15.57±0.26c	408.75±7.86c
	S2	26.42±0.09a	17.51±0.14b	464.74±12.15b
	S3	26.96±0.62a	19.12±0.93a	730.58±40.14a
花铃期	CK	25.02±0.01a	10.75±0.52d	326.88±13.93c
	S1	25.02±0.02a	13.73±0.39c	342.10±18.93bc
	S2	24.88±0.11a	15.16±0.10b	376.39±5.33b
	S3	24.69±0.08b	17.57±0.24a	507.21±14.97a
吐絮期	CK	24.48±0.03a	14.27±0.31c	393.57±6.16d
	S1	24.41±0.07a	16.01±0.59b	592.88±2.86c
	S2	24.19±0.03b	17.71±0.39a	741.14±25.44b
	S3	24.12±0.07b	18.12±0.50a	928.10±23.00a

表4 不同灌溉水矿化度下的土壤呼吸速率与土壤参数之间的相关关系

Tab. 4 Correlation between soil respiration rate and soil parameters under different irrigation water salinity

处理	因子	土壤呼吸速率	土壤温度	土壤水分	土壤电导率	土壤硝态氮	土壤铵态氮
CK	土壤呼吸速率	1	0.805**	0.603*	−0.259	−0.603*	0.444
	土壤温度		1	0.731**	−0.694*	−0.356	0.425
	土壤水分			1	−0.433	−0.680*	0.886**
	土壤电导率				1	−0.31	−0.016
	土壤硝态氮					1	−0.858**
	土壤铵态氮						1
S1	土壤呼吸速率	1	0.800**	0.499	−0.478	−0.592*	0.520
	土壤温度		1	0.626*	−0.710**	−0.312	0.577*
	土壤水分			1	−0.156	−0.651*	0.927**
	土壤电导率				1	−0.347	0.016
	土壤硝态氮					1	−0.772**
	土壤铵态氮						1
S2	土壤呼吸速率	1	0.612*	0.356	−0.359	−0.478	0.226
	土壤温度		1	0.727**	−0.755**	−0.332	0.501
	土壤水分			1	−0.146	−0.761**	0.924**
	土壤电导率				1	−0.345	0.142
	土壤硝态氮					1	−0.846**
	土壤铵态氮						1
S3	土壤呼吸速率	1	0.689*	0.288	−0.124	−0.415	0.301
	土壤温度		1	0.782**	−0.669*	−0.396	0.522
	土壤水分			1	−0.545	−0.533	0.670*
	土壤电导率				1	−0.305	0.016
	土壤硝态氮					1	−0.918**
	土壤铵态氮						1

注:**代表相关性达到极显著水平(P<0.01);*表示相关性达到显著性水平(P<0.05)。

表5 各土壤参数与土壤呼吸速率的回归关系

Tab. 5 Regression relationship between soil parameters and soil respiration rate

处理	自变量	拟合方程	R^2	P
CK	ST、EC	R_s=2.178ST+0.025EC−59.575	0.822	0.016
S1	ST	R_s=0.971ST−20.648	0.640	0.002
S2	ST	R_s=0.603ST−11.839	0.375	0.034
S3	ST、EC、NO_3^--N	R_s=1.517ST+0.008EC+0.474 NO_3^--N−42.514	0.850	0.017

注:R_s代表土壤呼吸速率;ST代表土壤温度;EC代表土壤电导率, NO_3^--N代表土壤硝态氮含量。

表6 各土壤参数与土壤呼吸速率的通径分析

Tab. 6 Path analysis of soil parameters and soil respiration rate

处理	因子	相关系数	直接通径	间接通径					
				ST	SWC	EC	NO_3^--N	NH_4^+-N	总间接
CK	ST	0.805**	0.604	–	0.090	0.087	0.374	−0.350	0.201
	SWC	0.603*	0.123	0.442	–	0.055	0.715	−0.730	0.482
	EC	−0.259	−0.126	−0.419	−0.053	–	0.326	0.013	−0.133
	NO_3^--N	−.603*	−1.051	−0.215	−0.084	0.039	–	0.707	0.447
	NH_4^+-N	0.444	−0.824	0.257	0.109	0.002	0.902	–	1.270
S1	ST	0.800**	0.044	–	−0.322	0.667	0.369	0.043	0.757
	SWC	0.499	−0.514	0.028	–	0.146	0.769	0.069	1.012
	EC	−0.478	−0.939	−0.031	0.080	–	0.410	0.001	0.460
	NO_3^--N	−0.592*	−1.182	−0.014	0.335	0.326	–	−0.057	0.590
	NH_4^+-N	0.520	0.074	0.0250	−0.476	−0.015	0.913	–	0.447
S2	ST	0.612*	2.305	–	−0.750	−0.800	0.282	−0.423	−1.691
	SWC	0.356	−1.032	1.676	–	−0.155	0.646	−0.781	1.386
	EC	−0.359	1.060	−1.740	0.151	–	0.293	−0.120	−1.416
	NO_3^--N	−0.478	−0.849	−0.765	0.785	−0.366	–	0.715	0.369
	NH_4^+-N	0.226	−0.845	1.155	−0.954	0.151	0.718	–	1.070
S3	ST	0.689*	1.542	–	−0.357	−0.346	0.200	−0.351	−0.854
	SWC	0.288	−0.456	1.206	–	−0.282	0.270	−0.450	0.744
	EC	−0.124	0.517	−1.032	0.249	–	0.154	−0.011	−0.640
	NO_3^--N	−0.415	−0.506	−0.611	0.243	−0.158	–	0.617	0.091
	NH_4^+-N	0.301	−0.672	0.805	−0.306	0.008	0.465	–	0.972

盐土壤较低盐土壤不但会导致土壤微生物量降低，而且会抑制作物对氮素的吸收利用，作物根系呼吸被削弱，致使土壤呼吸速率降低。魏琛琛等[14]通过对微咸水滴灌玉米的研究表明，微生物能够通过提高自身的代谢效率适应含盐量为5 g·L^{-1}灌溉水，进而不会对土壤CO_2累积排放量产生显著影响。而本研究中，5.0 g·L^{-1}的灌溉水会使土壤电导率显著增大，作物受到盐胁迫，根系生长受到抑制，进而使土壤呼吸速率显著降低。

3.2 各土壤参数对土壤呼吸速率的影响

土壤微生物呼吸和作物根呼吸均会受到土壤温度的影响，而且土壤中的生化反应也需要适宜的土壤温度，关于土壤温度和土壤呼吸速率之间的关系，一直是研究的热点[25]。朱艳等[26]也通过比较不同土层温度与土壤呼吸速率的相关性，发现表层土壤温度和土壤呼吸速率的关系最紧密。本文中的相关性结果也证明，0~10 cm的土壤温度和土壤呼吸速率的相关性最大，并在此基础上，对土壤温度和土壤呼吸速率的关系进行了回归分析。发现适宜土壤呼吸速率的土壤温度是一个范围，超过此范围均会抑制土壤呼吸。上官宇先等[27]的研究也表明，微生物的活动和生化反应的发生以及作物的根

呼吸都需要一个适宜的土壤温度,否则,均会减弱土壤呼吸速率。这也支持了本研究得出的结果,回归分析得出当土壤呼吸速率最大时,对应的土壤温度为26.9 ℃。

土壤盐分对土壤呼吸的影响较为复杂。土壤盐分增加不仅会使作物根系生长受阻,而且会影响土壤酶活性、土壤微生物活动,最终对土壤呼吸造成影响[28]。本研究中,由通径分析得出,随灌溉水矿化度的增加,土壤电导率对土壤呼吸速率的直接影响由负变为正(-0.126、-0.933、1.060、0.517),可以说明土壤呼吸需要一个适宜的盐分环境。王顺科等[29]研究表明,随土壤盐分的增加,微生物活性和群落结构受到影响,并且作物生长受到渗透胁迫,与土壤生物活性相关的功能酶活性降低,从而导致土壤CO_2排放减小。但杨玉海等[30]认为,在低盐浓度下,盐分增加会增强微生物活性,提高土壤有机碳矿化能力,可能会使CO_2排放增加。本研究中,3 g·L^{-1}的灌溉水,土壤电导率增加幅度较小,没有对土壤呼吸产生显著抑制作用,而≥5 g·L^{-1}的灌溉水,显著增加了土壤盐分,降低了土壤呼吸速率。

土壤水分对土壤呼吸速率的影响会受到很多其他因素的干扰,如土壤温度、土壤电导率、作物生长等。本研究中,土壤含水率与土壤呼吸速率存在相关关系,但不显著。研究表明,土壤含水率在14.8%~26.2%时,对土壤呼吸速率不会产生显著影响,超过这个范围会显著抑制土壤呼吸[26]。本研究中,土壤含水率绝大部分在17.73%~21.42%,只有花铃期CK处理下,土壤含水率为10.75%,这可能是土壤水分与土壤呼吸速率没有显著相关的原因。此外,吴瑞娟等[31]研究表明,土壤水分通过影响土壤通气性和土壤氧化还原反应来影响土壤呼吸速率,大部分情况和土壤温度协调作用于土壤呼吸,并建立了土壤湿度与土壤呼吸之间的模型,得到土壤含水率在35%左右时,土壤呼吸速率最大。本研究的通径分析,也证明不同矿化度灌溉水处理下土壤水分通过对其他土壤参数来间接影响土壤呼吸速率(各处理土壤水分对土壤呼吸速率的总间接系数分别为:0.482、1.012、1.386、0.744)。

土壤铵态氮和硝态氮对土壤呼吸速率的影响主要通过影响作物根系生长来实现,而在不同灌溉水矿化度处理下,作物生长又主要受到土壤盐分的影响,所以造成土壤呼吸速率与土壤铵态氮和土壤硝态氮相关性较小。灌溉水矿化度的增加使土壤铵态氮和硝态氮呈相反的变化趋势。这是由于灌溉水盐分增加显著影响了土壤中的氨氧化细菌(AOA)和氨氧化古菌(AOB)的丰度,改变了其结构,抑制了氨氧化微生物的活性,从而使土壤硝态氮含量降低,土壤铵态氮含量增加[10]。

4 结 论

灌溉水矿化度的增加不仅会使棉田土壤含盐量增加,而且会对土壤环境产生复杂影响。土壤呼吸速率的改变可以表征土壤环境的变化。主要结论如下:

(1) 使用8 g·L^{-1}的灌溉水进行膜下滴灌会使土壤含水率和电导率显著增大,土壤硝态氮含量显著降低,造成土壤养分流失,影响作物生长,降低了土壤呼吸速率。灌溉水矿化度为3 g·L^{-1}和5 g·L^{-1}会使棉田土壤水分和电导率增大,抑制土壤呼吸,但并未显著影响土壤矿质氮含量。

(2) 受灌溉水矿化度的影响,棉田土壤呼吸主要和0~10 cm的土壤温度相关,二者的关系可采用二次函数式来表征,26.9 ℃是土壤呼吸最适宜的土壤温度。咸水灌溉下,土壤水分不再是限制土壤呼吸速率的土壤参数,土壤电导率和土壤矿质氮与土壤呼吸速率的相关性增强。随着矿化度的增加,土壤电导率不仅直接作用于土壤呼吸,而且还通过抑制土壤温度和土壤硝态氮含量的改变来间接影响土壤呼吸速率。

(3) 综上分析,在本试验条件下,使用3 g·L^{-1}的灌溉水进行膜下滴灌,可以在不显著增加土壤含盐量的基础上,降低土壤呼吸速率,减少农田碳排放量。本研究可为新疆地区膜下滴灌棉花微咸水高效利用提供理论依据。

参考文献(References):

[1] 梁亚军, 王俊铎, 郑巨云, 等. 新疆2021年棉花生产概况及存在问题与策略[J]. 棉花科学, 2022, 44(2): 3-8. [Liang Yajun, Wang Junduo, Zheng Juyun, et al. Problems and strategies of cotton production in Xinjiang in 2021[J]. Cotton Science, 2022, 44(2): 3-8.]

[2] 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 等. 中国非常规水资源开发利用进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 960-969. [Ma Tao, Liu Jiufu, Peng Anbang, et al. Progress in development and utilization of non-conventional water resources in China[J]. Advances in Water Science,

2020, 31(6): 960–969.]

[3] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗, 等. 微咸水膜下滴灌对棉花生长及产量的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1627–1634. [Liu Xueyan, Ding Bangxin, Bai Yungang, et al. Effects of drip irrigation under brackish water film on cotton growth and yield[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1627–1634.]

[4] 胡雅琪, 吴文勇. 中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 69–76. [Hu Yaqi, Wu Wenyong. Review and development strategy of irrigation with unconventional water resources in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 69–76.]

[5] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗 等. 微咸水膜下滴灌对土壤盐分及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 410–417. [Liu Xueyan, Ding Bangxin, Bai Yungang, et al. Effects of drip irrigation under brackish water film on soil salinity and cotton yield[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 410–417.]

[6] 邹其会, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水与微咸水灌溉对土壤温室气体排放的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 80–82. [Zou Qihui, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Effects of water irrigation and brackish water irrigation on soil greenhouse gas emissions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 80–82.]

[7] 李晓菡, 邹俊亮, 武菊英, 等. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析[J]. 地球与环境, 2021, 50(4): 471–480. [Li Xiaohan, Zou Junliang, Wu Juying, et al. Response of soil respiration and organic carbon to warming and their influencing factors[J]. Earth and Environment, 2021, 50(4): 471–480.]

[8] 陈龙飞, 何志斌, 明姣, 等. 冻融作用对土壤呼吸影响的研究进展[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 917–924. [Chen Longfei, He Zhibin, Ming Jiao, et al. Research progress of effects of freeze-thaw on soil respiration[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 917–924.]

[9] Tu C, Li F D, Qiao Y F, et al. Effect of experimental warming on soil respiration under conventional tillage and no-tillage farmland in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(4): 967–979.

[10] 马丽娟, 张慧敏, 侯振安, 等. 长期咸水滴灌对土壤氨氧化微生物丰度和群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2797–2807. [Ma Lijuan, Zhang Huimin, Hou Zhen'an, et al. Effects of long-term saline water drip irrigation on the abundance and community structure of ammonia oxidizers[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(12): 2797–2807.]

[11] Charis-Konstantina Kontopoulou, Dimitrios Bilalis, Pappa Valentini A, et al. Effects of organic farming practices and salinity on yield and greenhouse gas emissions from a common bean crop[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 183: 48–57.

[12] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 108–123.

[13] Cheng M H, Wang H D, Fan J L, et al. Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107105.

[14] 魏琛琛, 任树梅, 徐子昂, 等. 灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 251–260. [Wei Chenchen, Ren Shumei, Xu Zi'ang, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation amount on greenhouse gas emission and spring maize growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 251–260.]

[15] Wei C C, Ren S M, Yang P J, et al. Effects of irrigation methods and salinity on CO_2 emissions from farmland soil during growth and fallow periods[J]. Science of The Total Environment, 2021, 752: 141639.

[16] Zong R, Wang Z H, Wu Q, et al. Characteristics of carbon emissions in cotton fields under mulched drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 105992.

[17] 周启星, 李晓晶, 欧阳少虎. 关于"碳中和生物"环境科学的新概念与研究展望[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 1–9. [Zhou Qixing, Li Xiaojing, Ouyang Shaohu. Carbon-neutral organisms as the new concept in environmental sciences and research prospects[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(1): 1–9.]

[18] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 298–305. [Zhu Yankai, Wang Zhenhua, Li Wenhao. Effects of different salt stress on physiological growth and yield of cotton under drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 298–305.]

[19] 赵波, 王振华, 李文昊. 滴灌方式及定额对北疆冬灌棉田土壤水盐分布及次年棉花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 139–148. [Zhao Bo, Wang Zhenhua, Li Wenhao. Effects of winter drip irrigation mode and quota on water and salt distribution in cotton field soil and cotton growth next year in northern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 139–148.]

[20] 张前兵, 杨玲, 孙兵,等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 77–84. [Zhang Qianbing, Yang Ling, Sun Bing, et al. Respiration characteristics of cotton soil under irrigation and fertilization measures inarid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 77–84.]

[21] 郑恩楠, 朱银浩, 胡建宇, 等. 水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 272–279. [Zheng Ennan, Zhu Yinhao, Hu Jianyu, et al. Coupling of water and fertilizer methods on growth of rice, soil respiration and inorganic nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 272–279.]

[22] Qiu W H, Liu J S, LI B Y, et al. N_2O and CO_2 emissions from a dryland wheat cropping system with long-term N fertilization and their relationships with soil C, N, and bacterial community[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8): 8673–8683.

[23] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土

壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901. [Wang Xinyuan, Li Yulin, Zhao Xueyong, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4890-4901.]

[24] 周慧, 史海滨, 张文聪, 等. 有机无机肥配施对盐渍化土壤微生物量和呼吸的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 86-95. [Zhou Hui, Shi Haibin, Zhang Wencong, et al. Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbial biomass and soil respiration in saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(15): 86-95.]

[25] 董倩倩, 范文波, 许忠宇, 等. 滴灌水量和土壤温度对桶栽棉花土壤剖面CO_2浓度影响的试验研究[J].干旱区研究, 2020, 37(3): 636-644. [Dong Qianqian, Fan Wenbo, Xu Zhongyu, et al. Effects of drip irrigation and soil temperature on CO_2 concentration in soil profile of barrel cotton[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 636-644.]

[26] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 223-232. [Zhu Yan, Cai Huanjie, Song Libin, et al. Effects of climate factors and soil parameters on soil respiration under oxygation conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223-232.]

[27] 上官宇先, 师日鹏, 韩坤, 等. 垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5729-5737. [Shangguan Yuxian, Shi Ripeng, Han Kun, et al. The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulchedridges and unmulched furrows[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5729-5737.]

[28] 张前前, 王飞, 刘涛, 等. 微咸水滴灌对土壤酶活性、CO_2通量及有机碳降解的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2743-2750. [Zhang Qianqian, Wang Fei, Liu Tao, et al. Effects of brackish water irrigation on soil enzyme activity, soil CO_2 flux and organic matter decomposition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2743-2750.]

[29] 王顺科, 李艳红, 李发东, 等. 新疆典型淡水湖和咸水湖芦苇湿地土壤CO_2、CH_4和N_2O排放研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1183-1193. [Wang Shunke, Li Yanhong, Li Fadong, et al. Emission of CO_2, CH_4 and N_2O from reed wetland soil of typical freshwater lake and saltwater lake in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1183-1193.]

[30] 杨玉海, 朱成刚, 汪洋, 等. 塔里木河下游生态输水对胡杨林生态系统碳循环的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 637-642. [Yang Yuhai, Zhu Chenggang, Wang Yang, et al. Effects of ecological water transport on carbon cycle of *Populus eukaryotica* forest ecosystem in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 637-642.]

[31] 吴瑞娟, 王迎春, 朱平, 等. 长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 44-52. [Wu Ruijuan, Wang Yingchun, Zhu Ping, et al. Effects of long-term fertilization on soil respiration in spring maize field in the central part of Northeast China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 44-52.]

Effect of the salinity of irrigation water on soil respiration rate in cotton field

LI Yanqiang[1,2,3], WANG Zhenhua[1,2,3], YE Hanchun[1,2,3], SONG Libing[1,2,3], LIU Jian[1,2,3], WEN Yue[1,2,3], WU Xiaodi[1,2,3]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: Four irrigation water salinity levels, namely, 0.85 g·L^{-1} (CK, local irrigation water salinity), 3 g·L^{-1} (S1), 5g·L^{-1} (S2), and 8 g·L^{-1} (S3), were examined to explore the effects of different salinity levels on soil respiration rate in cotton fields. A cotton field experiment with drip irrigation under film was carried out in Xinjiang. During the growth period of cotton, soil respiration rate (R_s) was recorded twice a month, along with soil temperature (ST), water content, electrical conductivity (EC), nitrate nitrogen content ($NO_3^- - N$) and ammonium nitrogen content ($NH_4^+ - N$). The influence of soil parameters on soil respiration rate under different salinities of irrigation water was studied by path analysis. Results showed that brackish water irrigation (S1 and S2) increased soil moisture content, EC and ammonium nitrogen content to a certain extent. Salt water irrigation (S3) significantly increased soil moisture and salinity, and decreased soil nitrate nitrogen content. The increase in the salinity of irrigation water decreased the soil respiration rate. The correlation between soil moisture and temperature and respiration rate decreased with the increase in the salinity of irrigation water. The quadratic function was used to represent the response of ST in 0−10 cm soil layer to soil respiration rate (R^2=0.669, P< 0.001). The optimal ST for soil respiration rate was 26.9 ℃. Under saline irrigation, the stepped-regression equation containing ST, conductivity, and nitrate nitrogen content could explain 85% of the variation of soil respiration rate. In conclusion, the use of 3 g·L^{-1} irrigation water for drip irrigation under film can reduce soil respiration rate and farmland carbon emissions without significantly increasing soil salt content. This work provides theoretical support for the development and utilization of brackish water resources in Xinjiang.

Keywords: soil parameters; soil respiration; salinity of irrigation water; stepwise regression; path analysis